

Háptica y Sonido: Introducción a la Síntesis Escaneada

Juan Reyes,
CCRMA, Stanford University
juanig@ccrma.Stanford.EDU

Resumen

El timbre como objetivo en un instrumento musical o como sonido que expresa algún significado, no solo es función de la escucha, también depende de la interacción con el instrumento y de su respuesta a una acción ejecutada por el intérprete o su manipulación. Al interpretar una nota musical, el músico está atento al comportamiento de su instrumento. Si el sonido no es el esperado, lo ajusta de tal manera que obtenga lo deseado. De esta forma el músico se vuelve parte de un sistema de control que se alimenta y retro-alimenta por medio de acciones. Este sistema o interfaz por lo general es un sistema háptico en donde intervienen el sentido del tacto y el movimiento muscular. La resistencia o fuerza en retorno que experimenta un intérprete al tocar su instrumento es utilizada como información para subsecuentemente manipularlo y lograr su objetivo. El sentido háptico es la resistencia que imprime un objeto al ser manipulado. La síntesis de sonido escaneada está basada en la vibración de un objeto y en como se puede controlar esta vibración con el sentido háptico, para obtener variaciones tímbricas en el sonido de un gesto musical.

1. Del Sonido a lo Háptico

Para lo háptico hay que cambiar el enfoque del sentido de la escucha al sentido del tacto. Sin embargo las cosas van mas allá del tacto, también incluyen un sentido que nos da la posición y movimiento con las extremidades del cuerpo conocido en ámbitos médicos como cinestesia. Cinestesia formalmente se define como la percepción de estímulos internos que permiten el monitoreo de la sensaciones de posición de las extremidades con respecto a la posición del cuerpo. Por lo tanto en háptica no solo se habla de sensores en la piel sino también de las articulaciones y de los músculos. El estudio de

lo háptico envuelve ambos sentidos tanto el tacto como el movimiento y la tensión muscular en cinestesia [Varios, 2007].

Aunque existen similitudes con el campo de la psico-acústica y como materias conjuntas, en un sentido mas general, la psico-física apunta hacia los sentidos hápticos que suministran métodos, segundos en importancia después de la escucha, sobre el comportamiento de un instrumento musical, cuando al tocarlo el intérprete se escucha así mismo e inmediatamente trata de “sentir el feeling” lo que está tocando. Esto implica que mientras el sonido porta el significado de algún tipo de información acústica, la háptica muestra el significado referente al comportamiento del instrumento y de las acciones del intérprete. Cabe anotar que es muy bien sabido durante el aprendizaje de un instrumento, el papel que juega la parte mecánica en la destreza musical [Gillespie, 1999].

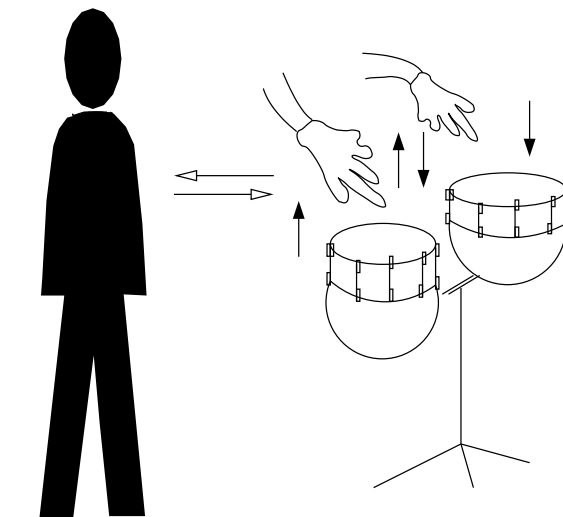


Figura 1: Retro-alimentación acústica y mecánica.

En la figura 1, el intérprete de un instrumento de percusión como un bongo o una conga, intercambia energía mecánica con el instrumento por medio de uno o mas contactos mecánicos que suelen ser de poca duración en estos instrumentos. Siendo el caso el flujo de información va en ambas direcciones entre el interprete y el instrumento. Un instrumento musical convierte un tipo de excitación mecánica en ondas sonoras. El escucha a la derecha en la figura 1, percibe y procesa el sonido creando un modelos mental del instrumento. En un estadio mas elevado, el escucha interpreta una idea musical expresada por el instrumentista. Un diagrama de flujo sobre

le proceso háptico puede apreciarse en la figura 2.

De gran importancia en relación con la háptica entre instrumento e intérpretes, son los procesos de percepción que ocurren al tocar un instrumento. En particular es importante la información que va recogiendo el intérprete sobre el comportamiento acústico de su instrumento. Igualmente el “feeling” o quizá color de ese sonido es obtenido a partir de un comportamiento mecánico ajustando una respuesta acústica a partir de un ajuste mecánico. En muchos casos la una es función de la otra dependiendo del diseño y de la física del instrumento. Consecuentemente el proceso de interpretación musical se realiza de la siguiente forma: el intérprete abstrae una impresión háptica sobre el estado de su instrumento, luego y dependiendo de claves en su percepción, decide manipularlo si desea un sonido diferente [O’Modhrain and Gillespie, 1995].

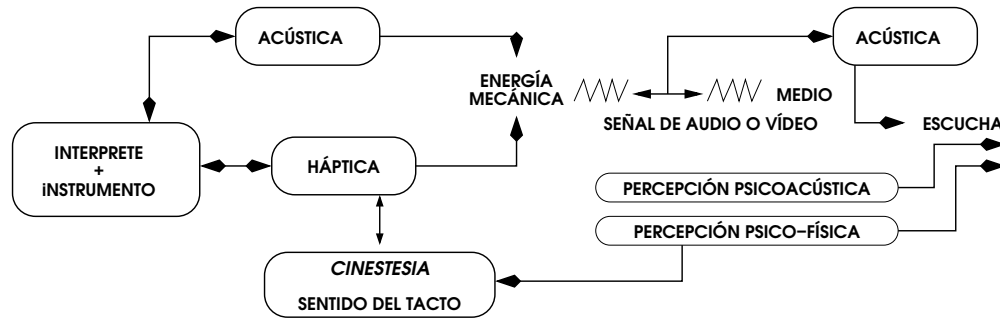


Figura 2: Diagrama de flujo del proceso háptico.

Al tocar un instrumento, el músico realiza ciertas acciones con la expectativa de obtener un cierto resultado normalmente en la forma de una interpretación musical. Al monitorear el instrumento, los sentidos hápticos del intérprete abarcan no solo procesos de percepción sino también interacción energética entre el músico y el instrumento. La información disponible a los sentidos depende de las acciones del músico o de como este controla su instrumento. La interacción mecánica y la noción sobre control del instrumento también deben estar ligadas. Por lo tanto si definimos vagamente música como un sonido que expresa algo con un tipo de significado, cualquier artefacto que produzca sonido bajo el control de un humano, se puede considerar como “instrumento musical”.

En los instrumentos musicales tradicionalmente utilizados en bandas u orquestas, el mecanismo de producción de sonido está basado en una excitación mecánica. En este caso la información sobre el control de una interpre-

tación, se haya encapsulada en la energía mecánica aplicada por el músico a través de un contacto físico. En el caso de instrumentos musicales electrónicos, no hay contacto físico por tratarse de señal eléctrica. Sin embargo la conversión de energía eléctrica a acústica sigue dependiendo del intérprete. En ambas situaciones el músico tiene que modular la señal de audio. Los dispositivos para controlar esta modulación involucran contacto mecánico o transductores de la acción del intérprete, en donde también se encuentra encapsulada la información sobre control del instrumento [Cook, 1999].

Recientemente se ha descubierto y se han desarrollado dispositivos para modificar instrumentos musicales tradicionales ampliando sus posibilidades con componentes electrónicos o con software de computador. De la misma forma varios instrumentos electrónicos se pueden beneficiar de acción mecánica para controlar su sonido. Mucho del interés en este punto se ha realizado en paralelo a investigación en interfaces con transductores que convierten energía mecánica (o de cualquier otro tipo en su omisión), en energía eléctrica o acústica. Analógicamente se han desarrollado circuitos y programas de computador que controlan la excitación de un instrumento [Nichols, 2002],[O'Modhrain and Chafe, 2000].

2. El Sentido Háptico en una Interpretación Musical

Los instrumentos musicales vibran por su naturaleza al producir un sonido pero también vibran produciendo sensaciones hápticas. Por ejemplo en el caso de los instrumentos de cobre o metales, la vibración háptica es utilizada para percibir los modos de resonancia del instrumento y para afinar el instrumento percibiendo sobre-tonos por medio de vibraciones de baja frecuencia aparentes en el cuerpo del instrumento con la boquilla y las manos. Este caso se repite en casi todos los instrumentos produciendo un movimiento que oscila entre los $10Hz$ y $1000Hz$, cada vez que hay una transición en una nota. Los cambios en el espectro del timbre de un instrumento también ocurren entre los $0Hz$ y $15Hz$., [Risset and Mathews, 1969].

3. Manipulación

Pasando de lo háptico a la manipulación, al manipular un objeto con una acción implica que el movimiento tiene una relación mas directa con las intenciones de la persona y prelación sobre lo háptico. En este caso la sensación háptica actúa como soporte al movimiento y es así como un

objeto que esta siendo manipulado, por ejemplo, desplazado por la mano de un lugar a otro, los dedos actúan como sensores de resistencia para saber si el objeto está en la posición deseada. Por lo tanto la información en retorno que se obtiene al manipular el objeto, ayuda en forma directa al control de la acción que se está llevando a cabo. Los sensores hápticos permiten que la información pertinente sea transmitida de regreso a centros responsables de la capacidad motriz y de la manipulación en el cerebro, actualizando la tarea con correcciones o confirmado o aserción o una predicción.

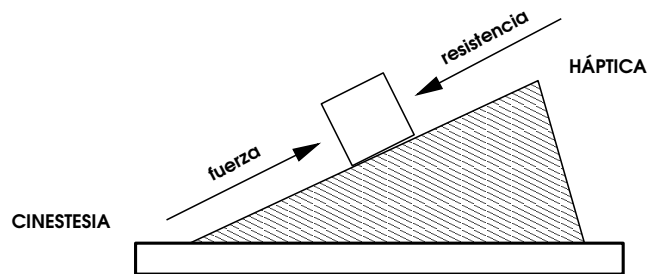


Figura 3: Control de retro-alimentación. Nótese que la fuerza para mover un objeto es función de resistencia por la pendiente hacía arriba.

4. Control de Retro-alimentación

El término “Control de retro-alimentación” es aplicable siempre que se controla o se perturba el estado de reposo o actividad de un objeto (ver figura 3). Para esto se utilizan sensores que monitorean el comportamiento de este volviéndola información que luego se transfiere a un sistema que decide y “controla” el estado del objeto. Por ejemplo en el caso de un violinista, para el control de retro-alimentación del instrumento, los sensores que monitorean el timbre, no solo dependen de la escucha sino de vibraciones que se transmiten al cuerpo por intermedio de la piel. Una vez obtenida la información pertinente, el violinista ajusta (manipula) la velocidad del arco o la relación de posición-cuerpo-instrumento [Chafe and O’Modhrain, 1996]. La información de retro-alimentación está contenida en la vibración del instrumento que a la vez también depende de las cualidades físicas como madera, tipo de resina o el metal de las cuerdas. En instrumentos electrónicos esta información es casi imperceptible delegando el control del sonido solamente a la escucha o quizás a lo visual en editores de audio en software [Gillespie, 1999].

5. Interfaz

La interfaz puede considerarse como un mecanismo o como el umbral que existe entre la persona, el interprete, el objeto o el instrumento. Interfaces exitosas incluyen algún tipo de háptica para controlar la manipulación y el estado del objeto. La interfaz permite interactuar con un objeto de acuerdo a unas normas de retro-alimentación entre la persona y las características de una acción a realizarse. En instrumentos musicales tradicionales, la interfaz está diseñada de tal forma que el instrumento puede ser manipulado para producir información musical. Para instrumentos por síntesis de audio ha habido aproximaciones desde los años setenta con el “Gestural Force-feedback transducer” [Cadoz, 1990], que es un joystick de computador motorizado que devuelve información al usuario sobre algún aspecto del sonido digitalizado, en forma y con parámetros de control de retro-alimentación.

Otras interfaces de este tipo incluyen el *Moose* de O’Modhrain con el que se pueden controlar aspectos del sonido en dos dimensiones ortogonales al tiempo. El moose originalmente había sido diseñado para investigar la posibilidad de utilizar tecnología háptica para representar elementos de interfaces gráficas de computador en usuarios ciegos. Uno de sus usos actuales es la edición de sonido con programas de edición por personas impedidas visualmente. El estudio de interfaces es un campo importante en ingeniería de sistemas, en diseño, en las artes y actualmente ha tomado importancia en la música por las deficiencias de la síntesis de audio digital y la interpretación en vivo con computadores [O’Modhrain and Gillespie, 1995].

Una investigación importante realizada a partir de un modelo mecánico sobre la interfaz del mecanismo de acción del piano y su cinemática (Gillespie, 1996), revela como es posible producir información musical a partir de retro-alimentación de fuerzas con la mecánica del instrumento por medio de frecuencias de modulación o manipulación del sonido muy por debajo de las frecuencias de audio. Esto comprueba que una ejecución musical no solo son vibraciones a las frecuencias de una altura dada en un sonido, sino también, la modulación con frecuencias hápticas (i.e. tremolo y vibrato entre otros), son necesarias para lograr un objetivo tímbrico. Esto último es la base de la Síntesis Escaneada de Mathews y Verplank [Bill Verplank and Mathews, 2000].

6. Síntesis de Audio Escaneada

Síntesis Escaneada o “Scanned Synthesis” es un método para generar sonidos en un modelo de computador en donde se tienen en cuenta los cambios en el espectro de un sonido, la vibración de un objeto y como se puede controlar esta vibración para obtener variaciones tímbricas en el sonido de un gesto musical. La esencia en síntesis escaneada es utilizar un objeto que vibre y que tenga frecuencias resonantes bajas de tal forma que puedan ser manipuladas por un intérprete con los movimientos de su cuerpo. Al escanear (medir) la forma de este objeto a lo largo de un sendero o trayectoria se produce una vibración. El periodo de la función de escaneado es la frecuencia fundamental del sonido que quiere ser creado. La función de escaneado traduce los cambios que lentamente ocurren en la forma de onda que produce el movimiento del objeto y los convierte en una onda sonora y en frecuencias que podemos escuchar.

La Síntesis de audio Escaneada también puede ser vista como descendiente de la síntesis de audio por tablas de forma de onda. En una tabla de onda, los puntos de una variable independiente en la función son calculados y almacenados en puntos seguidos en sucesión en un arreglo o en la memoria del computador. Este pedazo de memoria o tabla de ondas, es leído y subsecuente-mente interpolado para producir las muestras de la señal de audio en una onda de sonido. El periodo de leído en la síntesis escaneada es el mismo periodo del sonido sintetizado.

El generador háptico del modelo produce muestras de frecuencias de cambios de forma de onda espacialmente (i.e. frecuencias espaciales). La trayectoria de escaneo se convierte en un arreglo de números en la memoria del computador. Este arreglo se puede ver como una tabla de ondas dinámica. Los números en el arreglo son transformados a tasas hápticas con el generador háptico. Por lo tanto los resultados son función del tiempo y la posición en la tabla de ondas. Estos números son escaneados o leídos de acuerdo a su posición en la tabla de ondas por una función periódica escandirá cuyo periodo es la frecuencia de audio por ejemplo $1/440\text{seg.}$

Para que funcionen los números de la tabla de ondas dinámica, estos deben representar frecuencias espaciales de utilidad. No es suficiente que cualquier numero en el arreglo cambie a la frecuencia háptica. Un número individual dado, debe estar relacionado a sus vecinos a lo largo de la trayectoria de escaneo, de tal forma que represente una frecuencia espacial deseada. La frecuencia espacial es convertida a frecuencia en el tiempo por la función de escaneo. Esta propiedad se obtiene de acuerdo a funciones matemáticas producidas por el generador háptico.

7. Modelo de Síntesis Escaneada

Un modelo útil que genera frecuencias espaciales puede ser derivado del modelo de la cuerda con la aproximación de elementos finitos. En este la cuerda es pensada como un conjunto de masas interconectadas por resortes. Las ecuaciones para el movimiento de estas masas son derivadas de las ecuaciones de fuerza de Newton. Al excitar el sistema se puede visualizar una vibración que depende de la resistencia entre los resortes y las masas mas la interacción de todos los componentes con las leyes de acción y reacción. En esta aplicación de modelos de elementos finitos para síntesis escaneada existe un conjunto de masas conectadas con resortes y amortiguadores. Para su utilidad se adiciona a cada masa un amortiguador y se conecta cada uno de los resortes terminales a tierra. La amortiguación de las masas limita la vibración de la cuerda. En síntesis escaneada el intérprete manipula el modelo al presionar y al tocar las diferentes masas o al cambiar parámetros de masa, amortiguación o densidad y tensión del resorte [Boulangier and Smaragdis, 2000].

8. Espectros Dinámicos: cambios y manipulación del timbre

El sistema de síntesis de audio escaneada está basado en estudios de los años sesenta realizados por J.C. Risset y que muestran como un sonido interesante cambia continuamente en su duración. Estos cambios en el espectro ocurren con una periodicidad alrededor o menor de $15Hz$, que también es la rapidez de los movimientos del cuerpo [Risset, 1969].

En las últimas décadas el trabajo de Risset ha sido extendido para entender mejor las propiedades de estas variaciones espectrales y sobre como afectan la escucha y el cerebro. Las variaciones espectrales en el tiempo pueden ser caracterizadas por su propio espectro de frecuencias. Estas frecuencias son más bajas que lo audible típicamente entre $0Hz$, y $15Hz$.

Ya sea por una feliz coincidencia o por la forma en que somos los seres humanos, el rango de frecuencias en los cambios espectrales que experimenta y que se perciben en la escucha, es el mismo rango de frecuencias en los movimientos de las extremidades del cuerpo, ya sean los brazos, piernas, dedos u otros articuladores. La síntesis escaneada propone métodos para manipular directamente el espectro de un sonido con movimientos del cuerpo.

9. Conclusiones

- La síntesis de sonido escaneada está basada en psico-acústica y en particular sobre como se escucha y se aprecian cambios tímbricos en los sonidos que escuchamos. También se basa en la habilidad motriz o háptica para manipular estos sonidos al momento de una interpretación en vivo.
- Una de las cualidades importantes en este tipo de síntesis hace énfasis en el control del timbre por parte del intérprete.
- La síntesis escaneada envuelve un sistema dinámico lento cuyas frecuencias de vibración van por debajo de los 15Hz.
- El sistema se manipula directamente por el movimiento de interacción entre el intérprete y el sistema.
- La vibración del sistema es función de las condiciones iniciales, las fuerzas aplicadas por el intérprete y la dinámica del sistema.
- Ejemplos incluyen: cuerdas que vibran lentamente y ecuaciones de difusión en dos dimensiones (i.e. una lámina, una hoja de papel, una placa).
- Para producir frecuencias audibles la “forma” del sistema dinámico es restringida a una trayectoria cerrada y escaneada periódicamente.
- La altura es determinada por la función de velocidad del escaneo.
- El control de las alturas es totalmente independiente del sistema dinámico y por lo tanto la altura y el timbre son independientes.
- Este sistema también se puede visualizar como una tabla de ondas (wavetable) dinámica que está siendo manipulada en tiempo real por el intérprete.

Referencias

- [Bill Verplank and Mathews, 2000] Bill Verplank, R. S. and Mathews, M. (2000). Scanned synthesis. *Proceedings of ICMC Berlin*.
- [Boulanger and Smaragdis, 2000] Boulanger, R. and Smaragdis, P. (2000). Scanned synthesis: An introduction and demonstration of a new synthesis technique. *Proceedings of ICMC Berlin*.

- [Cadoz, 1990] Cadoz, C. e. a. (1990). A modular feedback keyboard design. *Computer Music Journal*, 14(2):47–51.
- [Chafe and O’Modhrain, 1996] Chafe, C. and O’Modhrain, M. S. (1996). Musical muscle memory and the haptic display of performance nuance. In *Proceedings of ICMC 1996 Thessaloniki*. ICMA.
- [Cook, 1999] Cook, P. R., editor (1999). *Music, Cognition, and Computerized Sound : An Introduction to Psychoacoustics*. MIT Press.
- [Gillespie, 1999] Gillespie, B. (1999). *Music, Cognition, and Computerized Sound : An Introduction to Psychoacoustics*, chapter 18, Haptics, pages 229–245. MIT Press.
- [Nichols, 2002] Nichols, C. (2002). The vbow: a virtual violin bow controller for mapping gesture to synthesis with haptic feedback. *Organised Sound*, 7:215–220.
- [O’Modhrain and Chafe, 2000] O’Modhrain, M. S. and Chafe, C. (2000). Incorporating haptic feedback into interfaces for music applications. In *Proceedings of ISORA, World Automation Conference 2000*.
- [O’Modhrain and Gillespie, 1995] O’Modhrain, S. and Gillespie, B. (1995). The moose: A haptic user interface for blind persons. Technical Report Report No. Stan-M95; CCRMA, Stanford University.
- [Risset, 1969] Risset, J. C. (1969). *An Introductory Catalog of Computer-synthesized Sounds*. Bell Laboratories.
- [Risset and Mathews, 1969] Risset, J. C. and Mathews, M. (1969). Analysis of instrumental tones. *Physics Today*.
- [Varios, 2007] Varios (2007). <http://es.wikipedia.org/wiki/Cinestesia>. Cinestesia o kinestesia, etimológicamente significa sensación o percepción del movimiento. En medicina y en psicología, ésta palabra alude a la sensación que un individuo tiene de su cuerpo, y en especial, de los movimientos que éste realiza. Sensación principalmente facilitada por los propioceptores, por ejemplo los ubicados en la cóclea del oído interno, y la percepción de la movilidad muscular.